第42卷 第1期
2025年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 1
Jan. 2025

新疆耕地利用碳源/汇效应时空演变特征及其贡献因子

吕 宁[1]，国 语[2]，彭 琴[2]，尹飞虎[1]，张嘉淇[1]，
刘杏认[3]，曾 梅[4]，许子函[3]

（1. 新疆农垦科学院，农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室，新疆 石河子 832000；2. 中国科学院地理科学与资源研究所，陆地表层格局与模拟重点实验室，北京 100101；3. 中国农业科学院，农业环境与可持续发展研究所，北京 100081；4. 北京林业大学，北京 100083）

摘 要：为探明新疆耕地利用碳效应的长周期时空变化特征，准确评估其固碳增汇潜力，本文通过收集1991—2021年的新疆农业数据，采用碳吸收和排放系数法，测度分析新疆耕地利用过程碳排放量、碳吸收量、碳汇量的时序动态，并利用莫兰指数、标准差椭圆和重心迁移分析耕地碳效应的空间分异、自相关性和演变特征，并揭示了其主要贡献因子。结果表明：（1）新疆耕地的碳吸收量远超碳排放量，总体表现为强的碳汇效应，且随时间推移碳汇能力呈增强态势，由1991年的830×10⁴ t增长至2021年的3429×10⁴ t。（2）强碳汇区域主要分布在耕地面积大且以种植玉米、小麦、棉花为主的生产区。（3）在县域尺度上耕地净碳汇具有显著的空间集聚特征，过去30 a耕地碳汇的重心总体上呈现由西南向东北迁移趋势，但仍集中于南疆的阿克苏地区。（4）施用化肥、机械作业、灌溉和农膜是主要的碳排放来源，其中，化肥和农膜投入对耕地碳排放贡献呈增加趋势。基于以上研究结果，提出可通过适度增加耕地面积、扩大南疆棉花和粮油作物种植布局、因地制宜推广麦后复播玉米、大豆、棉花提高复种指数、加大绿色农资物品投入等措施，在提高耕地产能保障粮食安全的同时，增强新疆耕地利用的碳汇效应。

关键词：新疆耕地；碳源/汇效应；莫兰指数；标准差椭圆；重心迁移轨迹模型；时空演变特征

减少温室气体排放、应对气候变化是一个备受全球关注的问题。农田作为陆地生态系统的重要组成部分，既是碳排放的来源，也是固碳的重要场所[1-2]。一方面，可通过农作物的光合作用和土壤转化固定CO_2[3]，据报道，全球每年约47%、20%的固碳量分别来自作物吸收和土壤的有机碳积累[4]。另一方面，耕地利用管理措施如机械作业、施肥、农药、灌溉等也会导致温室气体的排放，种植活动产生的温室气体占农业总排放的三分之二[5]。因此，农田系统在全球碳循环和气候调节中发挥着关键作用[6-7]。有研究测算得到，中国农田生态系统平均碳汇量为$0.43×10^9$ t·a^{-1}，其中土壤碳汇均值为$0.017×10^9$ t·a^{-1}[2,8]。准确识别耕地利用中的碳源碳汇属性及其驱动因素，对于提高农田碳汇潜力至关重要。

新疆国土面积$166×10^4$ km^2，占全国的1/6，现有耕地面积$703.86×10^4$ hm^2，位居全国第五。新疆是国家后备粮食基地和重要农牧产品生产基地，也是农田生态系统碳汇利用最具潜力的区域。针对新疆碳效应研究，学术界侧重于从不同行业或地理空间的视角，探讨了能源开发[9]、产业结构调整[10]、土地利用类型[11-12]对农业碳排放或碳吸收的影响，考察分析了农业碳排放特征及其与经济增长的脱钩效应[13-14]，综合考虑碳排放与碳吸收，测度农业净碳汇效应的研究报道较少。耕地利用碳效应方面，有学者从国家或地区层面比较各省市之间的空间差异，但仅关注了年份的静态变化[15-16]。20世纪90年代

收稿日期：2024-07-08；**修订日期：**2024-11-11
基金项目：新疆兵团科技创新人才计划(2022CB028)；国家重点研发计划资助(2022YFD1900405-3)；第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk1002)；国家自然科学基金(42177224，42277241)；中国工程院战略研究与咨询项目(2023-XY-34)；新疆兵团英才支持计划(2022)
作者简介：吕宁(1985-)，女，副研究员，从事干旱区农业资源与农田生态环境研究. E-mail: lvning20030118@163.com
通讯作者：彭琴. E-mail: pengqin@igsnrr.ac.cn

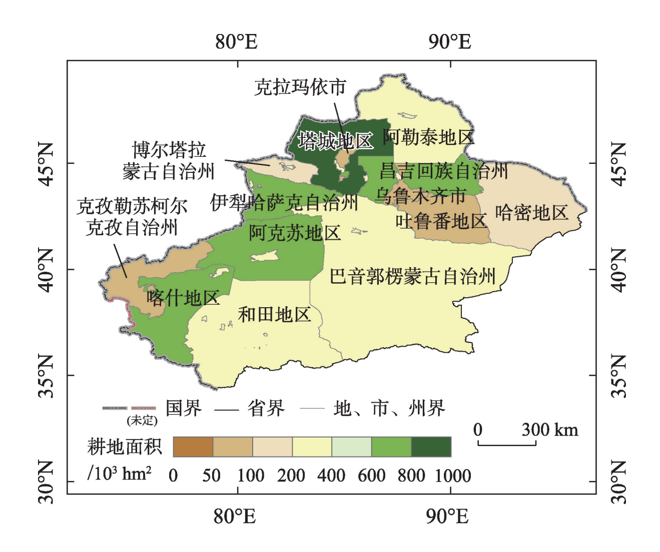
以来，随着节水灌溉技术的推广应用，新疆农业种植规模持续增长，其中，耕地面积增加了395.17×10^4 hm^2，灌溉面积增加了236.76×10^4 hm^2。近年来虽有研究关注盐碱地开垦[17]、灌溉措施[18]、绿色技术投入[19]等对新疆农业碳排放的影响，但重点在于揭示微观土壤固碳机制与技术投入强度的碳排效应。自20世纪90年代至今新疆的耕地利用碳效应时空变化及演变趋势尚不明确，关于耕地利用过程的碳汇潜力及其贡献因子仍无定论。

鉴于此，本文通过收集1991—2021年新疆各地州(市)耕地和9种作物种植数据，综合运用碳效应系数核算法、全局和局部莫兰指数法、标准差椭圆及重心迁移轨迹模型，全面分析新疆耕地碳排放、碳吸收及碳/源汇的长时序空间变化特征，并查明其主要贡献因子，科学评估新疆耕地利用的碳汇潜力及未来趋势，为制定合理的耕地利用政策、探索经济与生态平衡发展路径提供参考依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

新疆位于中国西北地区(34°22′~49°33′N，73°22′~96°21′E)，东西横跨约22.7个经度，南北跨越约14.8个纬度，地域辽阔，不同区域气候、地理、自然资源差异显著。新疆属于典型的干旱内陆气候区，降水量少且蒸发强烈，多年平均降水量仅为155 mm，南疆平原区甚至低于70 mm，而水面蒸发则高达1500~3400 mm。水资源时空分布极不均衡，西多东少、北多南少、山区多平原少。由于新疆农业高度依赖于灌溉，因此，各地州(市)耕地资源分布存在显著差异(图1)。根据第三次国土调查统计，新疆现有耕地703.86×10^4 hm^2，较第二次国土调查增加了190×10^4 hm^2，主要分布在西北部的塔城、昌吉回族自治州、伊犁哈萨克自治州、阿克苏和喀什地区，以上区域的耕地面积分别占全疆的15.73%、13.27%、10.31%、13.77%、14.15%。在耕地类型上，水浇地占比高达96%，而旱地仅占3.15%(表1)。从农作物结构来看，新疆以种植棉花、小麦和玉米为主，三类作物占农作物播种面积的70%以上。



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2024)0650号，对底图边界无修改。下同。

图1 新疆耕地分布示意图

Fig. 1 Distribution map of cultivated land in Xinjiang

表1 2019年新疆耕地类型及占比

Tab. 1 Type and proportion of cultivated land use in Xinjiang in 2019

区域	地州(市)	耕地面积/10^3 hm^2	水浇地/10^3 hm^2	水浇地占比/%	旱地面积/10^3 hm^2	旱地占比/%
北疆	乌鲁木齐市	73.77	61.87	83.87	3.79	5.13
	昌吉回族自治州	742.17	695.87	93.76	45.57	6.14
	克拉玛依市	66.39	66.39	100.00	0.00	0.00
	伊犁哈萨克自治州	681.57	541.65	79.47	121.17	17.78
	阿勒泰地区	282.01	278.65	98.81	3.37	1.19
	塔城地区	815.12	778.55	95.51	36.05	4.42
	博尔塔拉蒙古自治州	187.69	187.69	100.00	0.00	0.00
南疆	吐鲁番市	58.65	58.65	100.00	0.00	0.00
	哈密市	100.21	100.13	99.92	0.08	0.08
	巴音郭楞蒙古自治州	379.12	379.12	100.00	0.00	0.00
	阿克苏地区	659.37	641.35	97.27	0.05	0.01
	克孜勒苏柯尔克孜自治州	57.06	55.69	97.60	0.47	0.82
	喀什地区	709.96	706.33	99.49	0.43	0.06
	和田地区	226.46	220.56	97.39	0.00	0.00

1.2 研究方法

1.2.1 *耕地利用碳吸收的核算方法* 为了尽可能准确地反映新疆耕地利用碳吸收情况,根据数据的可获得性,选取新疆种植面积较大的水稻、玉米、小麦、豆类、薯类、棉花、油菜、葵花、甜菜和蔬菜等9种农作物作为测算对象,依据《IPCC国家温室气体清单指南》,结合已有相关研究,采用广泛使用的碳吸收量测算模型[20-22]计算各个作物的碳吸收总量,具体测算公式如下:

$$C=\sum_{i}\frac{Y_i\times C_i\times(1-F_i)}{M_i} \tag{1}$$

式中:C为耕地作物的碳吸收总量(t·a^{-1});Y_i表示第i种作物的经济总产量(t·a^{-1});C_i表示第i种作物的碳吸收率(%);F_i表示第i种作物经济产品部分的含水量;M_i表示第i种作物的经济系数,即经济产量与生物产量之比。各类农作物的碳吸收率与经济系数见表2。

表2 农作物的碳吸收率与经济系数

Tab. 2 Carbon absorption rate and economic coefficient of crops

品种	经济系数	含水量	碳吸收率
水稻	0.45	0.12	0.414
小麦	0.40	0.12	0.485
玉米	0.40	0.13	0.471
棉花	0.10	0.08	0.450
豆类	0.34	0.13	0.450
甜菜	0.70	0.75	0.407
葵花	0.30	0.10	0.450
油菜	0.45	0.10	0.250
薯类	0.42	0.70	0.700
蔬菜	0.45	0.90	0.300

1.2.2 *耕地利用碳排放量的核算方法* 不同耕地利用方式的碳排放量主要参考碳排放系数法[23],采用农业碳排放核算清单中的耕地利用途径与相应的碳排放系数的乘积之和来进行核算。本文根据新疆耕地利用实际情况,主要选取了化肥、农药、农膜、灌溉、机械化作业、翻耕6种最主要的耕地管理利用途径,计算其碳排放[20]。碳排放测算公式如下:

$$E=E_f+E_p+E_m+E_i+E_g+E_e \tag{2}$$

式中:E为耕地利用的碳排放总量(t);E_f、E_p、E_m分别为在耕地利用过程中使用化肥、农药、农膜所造成的碳排放量(t);E_i为农业灌溉过程产生的碳排放量(t);E_e为农业机械用电直接或间接产生的碳排放量(t);E_g则为因翻耕而造成的土壤有机碳库破坏所产生的碳排放(t)。

其中,不同耕地利用途径的碳排放量的估算均采用公式(3)计算:

$$E_n=T_n\times\delta_n \tag{3}$$

式中:E_n为第n类耕地利用途径碳排放总量(t);T_n为第n类耕地利用途径的消耗总量;δ_n为第n类耕地利用途径的碳排放系数。其中,化肥数据为当年折纯施用量,农膜以当年的实际使用量为准,农业灌溉数据为当年有效灌溉面积。特别需要指出的是,农业机械化操作产生的碳排放包括翻耕以及农业机械用电的碳排放,翻耕量采用农作物种植面积,机械用电总量采用农业机械总动力。为了便于计算和与其他省市相关研究结果进行比较,6种不同耕地利用途径的碳排放系数的确定主要参考了联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)的评估报告、联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,FAO)、美国橡树岭实验室,以及公开发表的文献[24-27],具体见表3。

表3 不同耕地利用途径的碳排放系数及参考来源

Tab. 3 Carbon emission co-efficients for different cultivated land use pathways and reference sources

碳排放源		碳排放系数	文献参考来源
	化肥/(kg·kg^{-1})	0.896	[24]
	农药/(kg·kg^{-1})	4.934	[25]
	农膜/(kg·kg^{-1})	5.180	[25]
	灌溉/(kg·hm^{-2})	266.480	[26]
	翻耕/(kg·hm^{-2})	312.600	[27]
机械作业	机械总动力/(kg·kW^{-1})	0.180	[24,26]
	种植面积/(kg·hm^{-2})	16.470	[26]

1.2.3 *耕地净碳汇量、碳汇强度的核算方法* 基于种植作物的碳吸收量以及耕作活动所产生的碳排放量数据,进一步利用差减法计算得出耕地的净碳汇量,通过碳吸收量和碳排放量的时间动态变化,进一步分析阐明新疆耕地质量变化过程中的碳汇效应变化,相关计算公式如下:

$$C_{净}=C_{吸}-C_{排} \tag{4}$$

式中:$C_{净}$为耕地利用的碳汇量(t);$C_{吸}$和$C_{排}$分别为

碳吸收量(t)和碳排放量(t)。

为了反映单位耕地面积的碳吸收、碳排放和净碳汇量,对耕地的碳效应强度,即耕地碳吸收、碳排放和碳汇强度进行了计算,公式如下:

$$C_{强} = C_{总量}/S_{耕} \tag{5}$$

式中:$C_{强}$ 为耕地利用碳吸收强度(t·hm^{-2})、碳排放强度(t·hm^{-2})、净碳汇强度(t·hm^{-2});$C_{总量}$ 为耕地利用碳吸收总量(t)、碳排放总量(t)、净碳汇总量(t);$S_{耕}$ 为全疆或各地市州的耕地面积(hm^2)。

1.3 耕地利用碳效应空间特征分析方法

采用全局莫兰指数(Global Moran's I)[28]和局部莫兰指数(Local Moran's I)[29]分析新疆地州(市)耕地利用碳效应是否存在空间相关性。全局莫兰指数计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{6}$$

式中:I 为全局莫兰指数值;n 为研究对象的个数;x_i 和 x_j 为目标属性特征在研究对象 i 和 j 上的观测值;W_{ij} 为研究对象 i 和 j 的相邻权重,邻接是1,反之为0;$\bar{x}$ 为变量的平均值。当莫兰指数的取值范围在[-1,1],绝对值越大空间相关性越明显。I 值为正表示空间正相关,呈现集聚效应,I 值为负表示空间负相关,呈现离散效应。莫兰指数越接近0表示在空间上的相关性越低。

在分析全局空间相关性的基础上,进一步计算局部莫兰指数。局部莫兰指数最早由Anselin[29]提出,主要用来反映局部地区是否存在相似或相异的集聚分布。当局部Moran's I >0时,则表示 i 地区和邻近地区在空间上表现为集聚分布;当局部Moran's I<0时,则表示 i 地区与邻近地区在空间上表现出离散分布。

重心迁移轨迹模型(Center of Gravity Migration Trajectory Model,CGMTM)[30]和标准差椭圆(Stardard Deviational Ellipse,SDE)[31]相结合,能够从全局的角度反映地理要素的分布方向和范围,广泛应用于研究对象长时间序列的时空格局演变研究。本文利用CGMTM和SDE模型定量分析新疆各地州(市)耕地碳汇的空间变化特征以及随着时间的重心轨迹迁移特征。

1.4 数据来源

本文中的新疆农作物种植面积、产量、灌溉、化肥、机械等的投入数据来源于1990—2022年的《新疆统计年鉴》《中国农村统计年鉴》和《中国县域统计年鉴》,具体数据主要包括农作物播种面积和产量以及部分年份的作物单产、化肥施用量(折纯)、农药使用量、农膜消耗、农业机械总动力、有效灌溉面积等。其中,农业机械化的电能消耗以当年农业机械总动力为准;农业机械化能源消耗主要用于翻耕,翻耕面积以当年农作物播种面积为准;农业灌溉耗能以有效灌溉面积为准;计算耕地碳吸收量所需各个地州(市)的作物总产和单产以及不同农作物对应的经济系数、碳吸收率和含水率等数据主要来源于文献[21];计算耕地利用途径碳排放量的碳排放系数主要来源于文献数据[24-27]。

2 结果与分析

2.1 新疆耕地利用碳效应的时间动态

如图2a所示,1991—2021年新疆耕地利用过程碳吸收量与碳排放量均呈现持续增长的趋势。其中,碳吸收量从1991年的1045×10^4 t增加至2021年的4126×10^4 t,增幅近300%。碳排放量由1991年的232×10^4 t增长至2021年的697×10^4 t,增幅约200%。由于各年份碳吸收量始终超过碳排放量,因此,此期间新疆耕地利用表现为强碳汇,且逐年增强,碳汇总量从1991年的830×10^4 t增至2021年的3429×10^4 t,30 a增长近4倍。从1991—2001年、2001—2011年和2011—2021年三个阶段的十年增长率来看(图2b),发现2001—2011年耕地碳排放、碳吸收和碳汇总量的增速最快,这十年的碳汇总量增长率高达98%,远超其他两个时段。

为了更精确地揭示耕地利用活动的碳效应,消除耕地面积变化的影响,对1991—2021年单位面积耕地的碳吸收、碳排放和碳汇强度进行测度分析(图3)。可以看出,过去的30 a,单位面积耕地的碳吸收强度持续上升,波动范围在4.0~7.9 t·hm^{-2};而单位面积耕地的碳排放强度则逐年下降,其数值大致比碳吸收强度低一个数量级,介于0.3~0.7 t·hm^{-2}。单位面积耕地的碳汇强度自1991年的3.3 t·hm^{-2}增长至2021年的7.5 t·hm^{-2},净碳吸收能力呈稳定上升趋势。这表明,近30 a来新疆耕地利用碳汇作用的

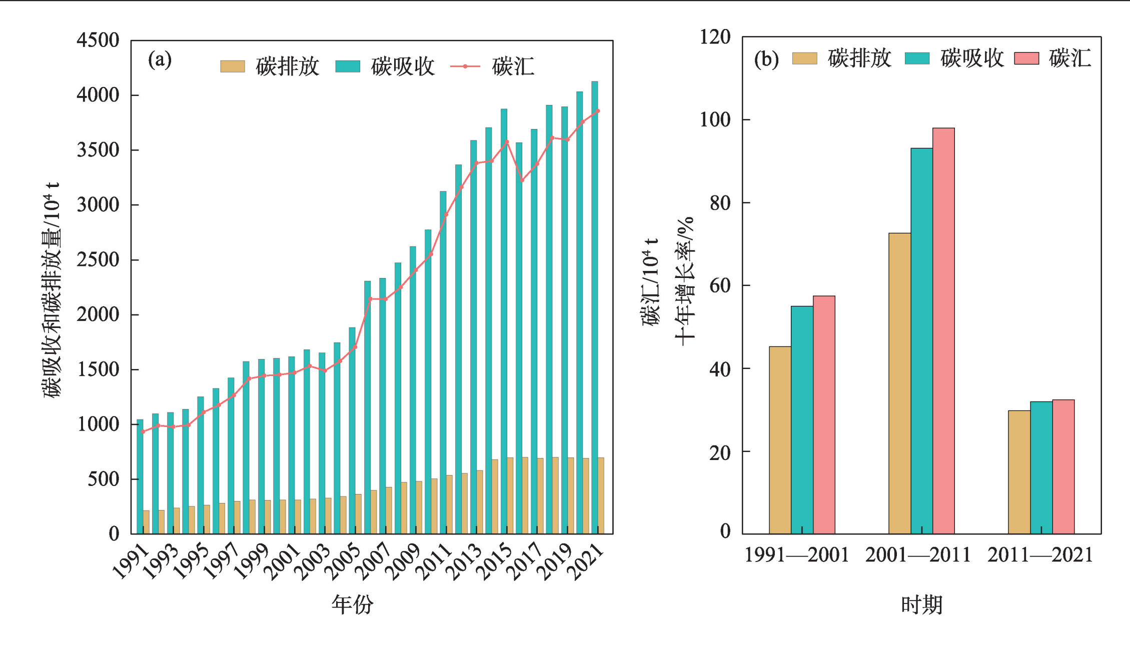


图2　1991—2021年新疆耕地碳吸收、碳排放和碳汇总量的时间动态及十年的增长率

Fig. 2　Temporal dynamics and decade growth rates of carbon sequestration, carbon emission, and total carbon sequestration of cultivated land in Xinjiang from 1991 to 2021

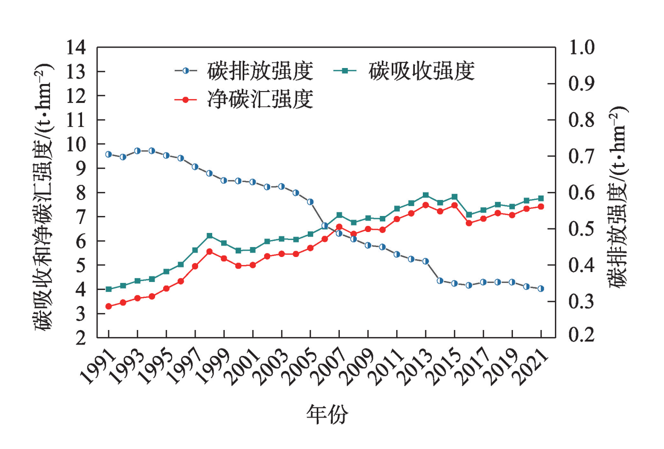


图3　单位面积耕地的碳排放、碳吸收和净碳汇强度时间动态

Fig. 3　Temporal dynamics of carbon emissions, carbon sequestration, and net carbon sequestration intensity per unit area of cultivated land in Xinjiang

增强不仅与面积扩大有关,还可能与耕作方式改变和技术输入带来的作物产量提升紧密相关。

2.2　新疆耕地利用碳汇效应的空间分布及演变特征

近30 a新疆耕地利用碳汇效应的空间分布变化如图4所示,除1991年(图4a)克拉玛依市短暂表现为碳源外,新疆各地州(市)的耕地均持续呈现出显著的碳汇特征,且空间分布区域间差异较大,这与耕地碳吸收量的空间变化相一致。碳汇超过100×10^4 t的地州(市)数量随着时间推移而增加。喀什地区因其耕地面积大且主要种植作物为棉花和粮食,其碳汇量在2011年(图4c)和2021年(图4d)均超600×10^4 t。阿克苏、伊犁哈萨克自治州、昌吉回族自治州和塔城等地也呈现高碳汇特征,净碳汇量在2011年和2021年均超400×10^4 t。克拉玛依市、乌鲁木齐市、克孜勒苏柯尔克孜自治州、吐鲁番市和哈密市,碳汇量普遍低于50×10^4 t,呈现为碳汇空间上的低谷区,这与以上地区农业规模相对较小密切相关。

新疆各地州(市)1991—2021年每隔十年的碳汇强度演变如图5所示,1991年(图5a),各地州(市)的碳汇强度均未超过5 t·hm^{-2}。2001年(图5b),仅博尔塔拉蒙古自治州(博州)和阿克苏地区的碳汇强度有所突破。到了2011年(图5c)和2021年(图5d),多数地州(市)的碳汇强度显著提升,其中,2021年的昌吉州、阿克苏、巴州、伊犁州、塔城和博州保持高碳汇强度。总体来看,博州在4个考察年份中碳汇效应均突出,北疆的阿勒泰、乌鲁木齐和吐鲁番的碳汇强度始终较低,而塔城地区呈显著上升趋势,南疆的喀什、和田地区的碳汇强度排名随时间推移下降。

选取1991年、2001年、2011年和2021年4个截面年份对新疆耕地碳汇总量进行空间自相关分析,可以看出,不同年份全局莫兰指数均大于0,且通过显著性水平(P<0.05)检验,表明新疆耕地碳汇具有空间正相关性,呈现出显著的空间集聚状态(表4)。

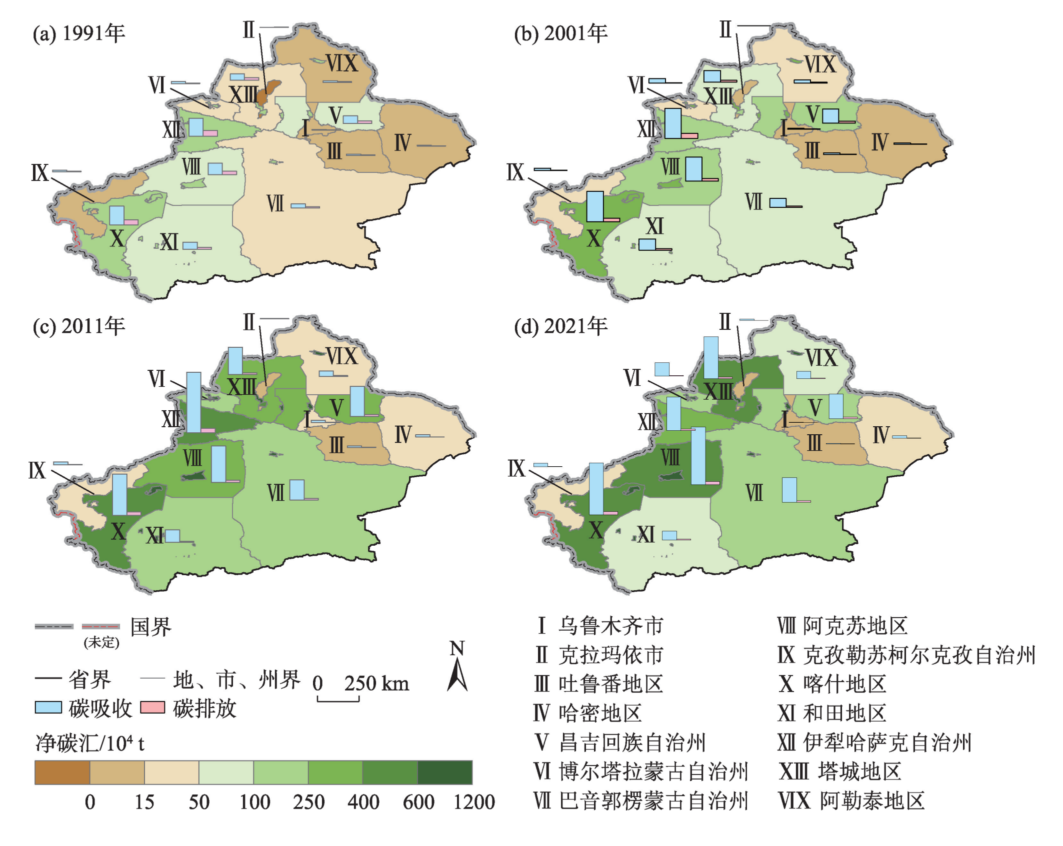


图4 不同年份新疆耕地利用的碳排放、碳吸收和碳汇量的空间分布特征

Fig. 4 Spatial pattern of carbon emission, carbon sequestration and carbon sequestration amounts of cultivated land in Xinjiang in different years

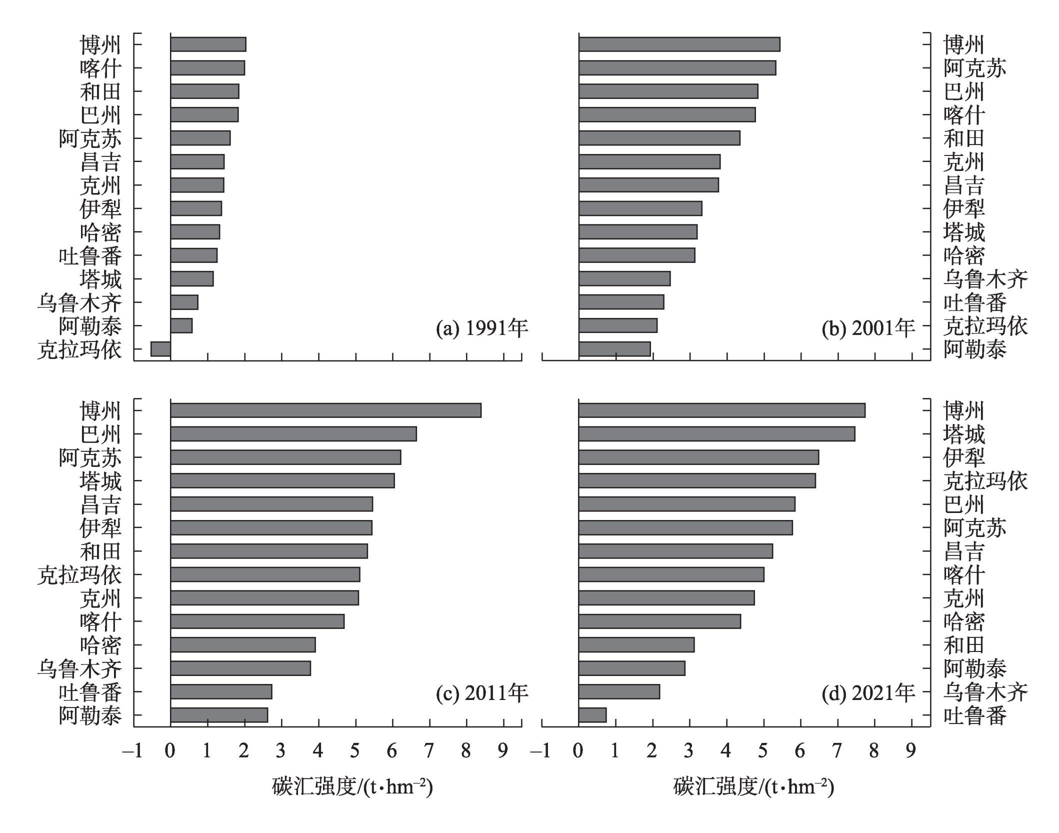


图5 不同年份新疆各地州(市)的碳汇强度

Fig. 5 Carbon sequestration intensity of various cities in Xinjiang in different years

表4　新疆各地州(市)耕地碳汇全局莫兰指数及显著性

Tab. 4　Global Moran's *I* of carbon sink in cultivated land in counties and cities of Xinjiang

年份	Global Moran's *I*	*P*值
1991	0.296	0.0002
2001	0.207	0.0010
2011	0.205	0.0140
2021	0.215	0.0049

局部莫兰指数结果显示(图6),耕地碳汇高-高聚集区主要位于南疆以及伊犁州部分区域,但随着时间推移数量逐渐减少,低-高聚集区的数量略有增加,低-低聚集区主要位于北部的阿勒泰地区。2021年(图6d)和田地区的南部出现了碳汇的低-低聚集区。低-高聚集区的数量多于高-低聚集区。总体上,随着时间推移,低-高聚集区的数量整体上在增加。

基于各地州(市)1991年、2001年、2011年、2021年4个特征时间节点的碳汇面板数据,利用标准差椭圆及重心迁移轨迹,绘制分析新疆耕地利用碳汇的空间分布及演变趋势。如图7所示,新疆耕地碳汇总体呈现出"西南—东北"的分布趋势,其重心集中在阿克苏地区,迁移轨迹总体上由西南向东北移动。1991—2011年耕地碳汇重心迁移速率不断加快。其中,1991—2001年重心迁移距离达34.9 km,

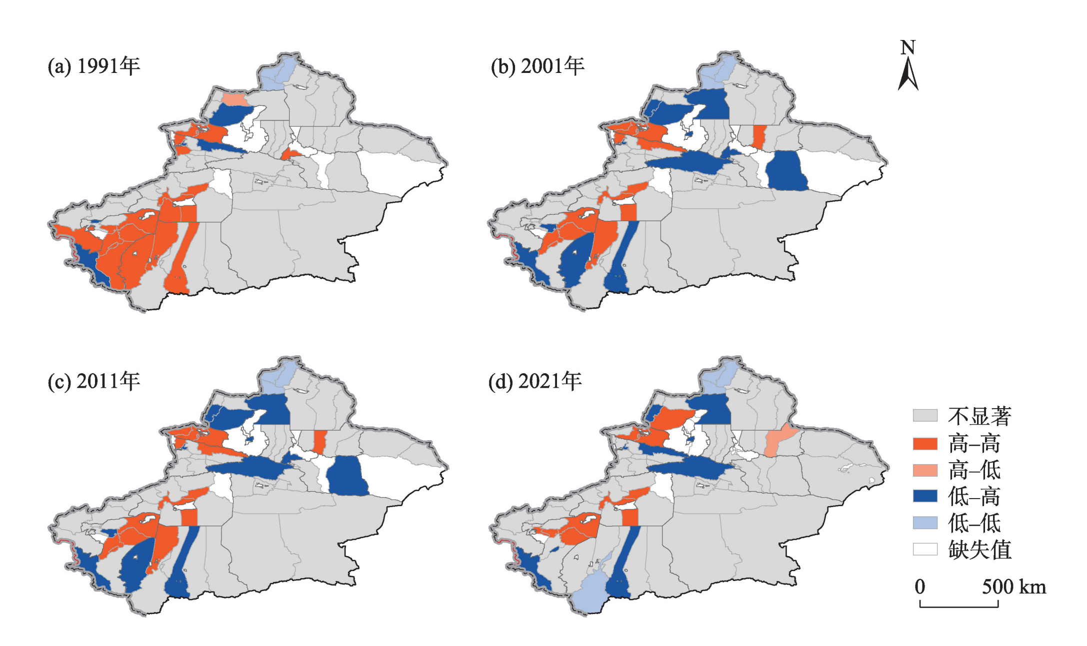


图6　新疆耕地碳汇的局部莫兰指数

Fig. 6　Local Moran's *I* index of carbon sink in cultivated land in Xinjiang

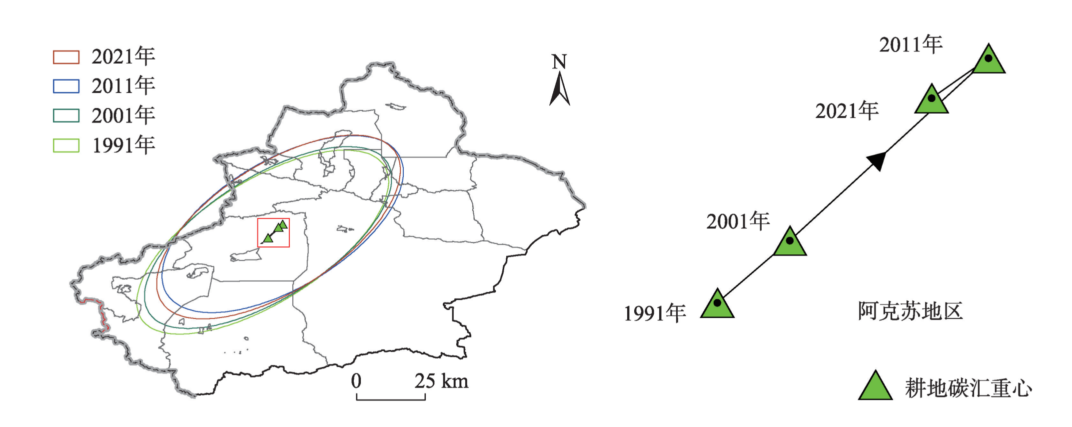


图7　新疆耕地碳汇标准差椭圆及重心迁移示意图

Fig. 7　Schematic diagram of the standard deviation ellipse and the center of gravity migration of cultivated land carbon sink in Xinjiang

2001—2011年重心迁移距离达98.4 km，2011—2021年迁移速率略有下降，期间重心迁移距离下降为25.3 km，重心略有回调。

2.3 耕地利用碳汇效应的贡献因子

如图8所示，近30 a来，新疆耕地利用碳吸收量主要由棉花、小麦、玉米等主导农作物所决定，其对碳吸收总量的贡献高达83%~93%，棉花的贡献优势最为突出，从1990年的20%增长至2017年后的50%以上；玉米的贡献比例保持相对稳定，约占15%；小麦的贡献率呈现下滑趋势，从1990年的43%降至2021年的17%；其他作物贡献则相对较小，合计贡献比例约占15%。贡献度评价结果显示了主要农作物（玉米、小麦和棉花）在增强耕地碳汇功能中的重要作用，表明新疆耕地利用可实现国家粮食安全与固碳减排双重目标。

通过公式（2）~公式（3），计算得到6种耕地利用活动对碳排放总量的贡献。如图9所示，化肥、农田耕作、灌溉以及农膜使用是对碳排放总量影响最为显著的活动。农田耕作和灌溉所产生的碳排放比例呈下降趋势，而化肥和农膜使用的碳排放比例却有所上升，农化品投入依然是新疆耕地碳排放的重要来源。

3 讨 论

耕地是巨大的碳库。有研究报道，中国土壤固碳潜力在(22.9~27.8)×10^6 t·a^{-1}（CO_2当量）左右[32]。本文以新疆绿洲农田为对象，剖析近30 a新疆耕地利用碳效应时空变化特征及其贡献因子。从时间维度来看，1991—2021年碳吸收量从1045×10^4 t增长至4126×10^4 t，而碳排放量也呈攀升态势，但总体上，由于作物碳吸收远超耕地利用活动的碳排放，因此呈现出强的净碳汇走向，净碳汇总量自1991年的830×10^4 t增加到了2021年的3429×10^4 t。分析耕地碳吸收的贡献因子得到，一方面归因于新疆耕地面积的持续增加，这一结论与He等[33]、Zhang等[34]学者的研究观点相一致。另一方面与作物种植结构及规模密切相关，棉花、玉米、小麦是新疆的主导作物，均属于高光效和高生物量作物，新疆三大作物种植面积从1991年的213.34×10^4 hm^2增加到2021年的475.16×10^4 hm^2，增加了2倍之多。郭霞[35]研究指出，植物体每累积1 kg干物质，可吸收1.74 kg CO_2。碳吸收量与农作物生物量和产量正相关，农作物年均碳吸收量可达4.5 t·hm^{-2}[36]。项目组开展的棉田CO_2浓度增施试验（Free-Air Concentration Enrichment，FACE）也得到验证，当冠层CO_2浓度增加到300 ppm，低氮养分下棉花的光合效率和产量显著增加[37]。

值得关注的是，农业生产活动中的机械动力、耕作、灌溉和化肥施用在提高生物产量的同时，也是引发碳排放的重要因子。Qin等[18]研究指出，全球每年因灌溉排放的CO_2为216×10^6 t，相当于整个农业

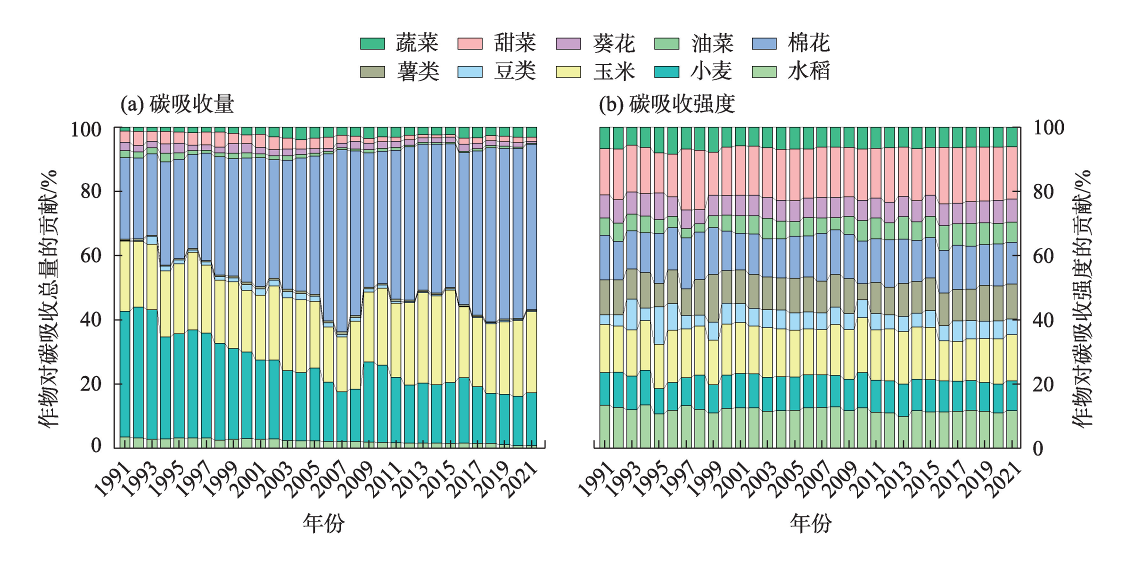


图8 不同作物对耕地碳吸收量（a）和碳吸收强度（b）的贡献及时序动态

Fig. 8 Contribution of different crops to the total carbon sequestration (a) and carbon sequestration intensity (b) of cultivated land and their temporal dynamics

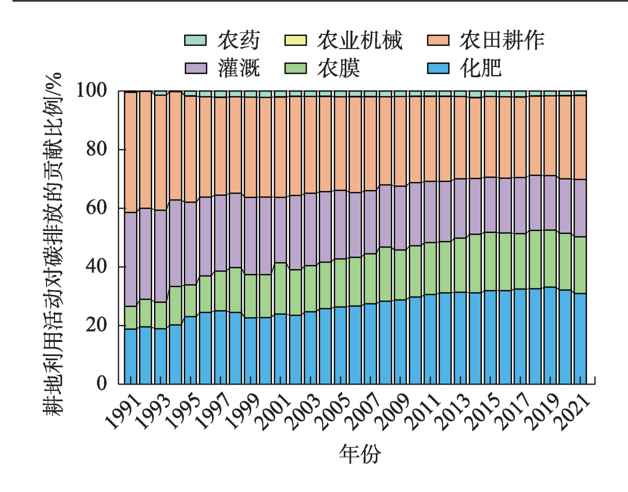


图9 不同的耕地利用活动对碳排放的贡献率

Fig. 9 Contribution ratio of different cultivated land use activities to carbon emissions

生产要素投入碳排放总量的15%,因此,选择合理的灌溉方式对减少农田碳排很关键。Qiang等[38]研究发现,利用间作或套作协同田间条带状种植,分层分时交替延续用光,提高了光能利用率,大大降低碳足迹。虽然过去30 a里新疆耕地利用净碳汇增幅显著,但相较于河南、山东等地[39],新疆耕地碳汇增量潜力仍具有较大的提升空间。

从空间变化来看,新疆耕地碳汇呈现显著的地区分异,考察期内昌吉州、阿克苏地区、巴州、伊犁州、塔城地区和博州始终保持高碳汇强度,其中,塔城地区上升趋势最明显。这与区域间耕地资源分布与主要作物种植布局显著相关,塔城地区是新疆耕地面积分布的最大区域(110.73×10^4 hm^2),且以种植粮食作物和甜菜等作物为主。粮食和棉花主产区的地州(市)在净碳汇总量上优势突出。1991—2021年新疆耕地净碳汇重心整体由西南向东北移动,这与南疆和田和喀什碳汇强度减小,而北疆塔城等地碳汇强度显著增强有关,总体上与新疆耕地资源开发和农业功能区调整的移动方向保持一致[40]。尽管如此,耕地碳汇强度的重心依然位于南疆的阿克苏地区,表明南疆仍然是新疆耕地碳汇的主要区域。全局和局部莫兰指数显示,县域空间尺度上的净碳汇呈现空间集聚特征,高-高集聚效应主要在南疆的喀什、和田地区以及伊犁和博州的部分地区。从区域层面来看,碳效应的空间集聚与走向与其地理、经济、产业结构及邻近地区技术活动等紧密相关[41],受到农业人口规模、城镇化和产业集聚程度等综合影响,且呈现长期的累积效应。由此受到启发,后续将从土地利用规模、经济因素、劳动力结构及技术创新等多维建模,进一步论证新疆耕地碳汇作用潜力及其影响因子。

4 结论与启示

4.1 结论

通过对1991—2021年新疆耕地利用碳吸收、碳排放、净碳汇效应的时空变化特征及其贡献因子全面解析,得出以下结论:

(1) 新疆耕地利用碳吸收量、碳排放量均呈持续增长趋势,但碳吸收量远超过碳排放量,因此总体表现为强碳汇效应,30 a增长近4倍,其中2001—2011年为增长速度最快的时期。

(2) 各地州(市)的耕地碳汇量呈现显著的空间差异性,这与各地区的耕地资源、种植结构及规模正相关;县域尺度上净碳汇存在着显著的空间集聚效应,碳汇高-高聚集区主要位于南疆以及伊犁州、博州部分区域,碳汇重心逐渐由西南向东北方向移动,但重心仍然位于南疆的阿克苏地区。

(3) 耕地碳吸收量中,83%~93%的比例是由棉花、小麦、玉米贡献,三大作物也是新疆的主要农作物。

(4) 农田耕作、灌溉、化肥和农膜使用是新疆耕地利用中的主要碳源,其中,化肥和农膜投入对耕地碳排放贡献依然呈增加趋势。

4.2 政策启示

基于本文研究结果,结合新疆农业实际,提出以下提升耕地利用碳汇潜力的政策启示:

(1) 适度开发盐碱地等后备耕地资源,稳定扩大耕地面积,同时采用增施有机肥、秸秆还田以及保护性耕作等措施,提高耕地有机碳含量,通过增加数量和提高质量,挖掘新疆耕地的碳汇潜力。

(2) 针对南疆喀什和和田地区碳汇强度的减小,可通过综合应用土地整治开发、优化种植结构和灌溉措施,以恢复和增强其碳汇能力;对于北疆部分碳汇强度高但总量低的地区,可根据水资源状况开发耕地面积,增加高-高碳汇聚集区数量。

(3) 加大南疆地区粮油作物的种植布局,推广应用合理的耕种制度,如采用小麦复播玉米、棉花、大豆等轮作技术,提高复种指数,增加地表覆盖,提高耕地碳吸收量。

(4) 实施绿色可持续的农田管理措施,如推广

应用高效水肥和光伏发电提水技术,减少灌溉过程能耗引起的碳排量;研发和推广应用生物有机肥、生物降解膜等绿色物化品投入,降低碳源排放。

致 谢 文中相关调查数据的获取得到了新疆维吾尔自治区农业农村厅的大力支持,建模分析得到了中国科学院地理科学与资源研究所齐玉春老师的悉心指导,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

[1] Nayak D, Saetnant E, Cheng K, et al. Management opportunities to mitigate greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J]. Agriculutre, Ecosystems and Environment, 2015, 209: 108-124.

[2] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9405-9416. [Zhao Mingyue, Liu Yuanxin, Zhang Xueyan. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9405-9416.]

[3] Black J C C. Photosynthetic carbon fixation in relation to net CO_2 uptake[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1973, 24(1): 253-286.

[4] 宋艳华, 王自威, 袁晨光, 等. 河南省耕地质量变化对农田固碳能力的影响[J]. 地域研究与开发, 2023, 42(4): 143-148, 180. [Song Yanhua, Wang Ziwei, Yuan Chenguang, et al. Study on influence of cultivated land quality change on carbon sequestration capacity of farmland ecosystem in Henan Province [J]. Aeral Research Aan Development, 2023, 42(4): 143-148, 180.]

[5] Quiggin J. Agriculture and global climate stabilization: A public good analysis[J]. Agricultural Economics, 2010, 41: 121-132.

[6] Li M Q, Liu S L, Sun Y X, et al. Agriculture and animal husbandry increased carbon footprint on the Qinghai-Tibet Plateau during past three decades[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123963.

[7] 方精云. 碳中和的生态学透视[J]. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1173-1176. [Fang Jingyun. Ecological perspectives of carbon neutrality[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(11): 1173-1176.]

[8] Jiang F, Chen J M, Zhou L, et al. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 22130.

[9] 包佳玉, 李祥龙, 胡启文, 等. 新疆能源消费碳排放时空特征及能源结构调整路径探讨[J]. 干旱区研究, 2024, 41(3): 490-498. [Bao Jiayu, Li Xianglong, Hu Qiwen, et al. Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption and the approach to energy structure adjustment in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(3): 490-498.]

[10] 宋梅, 时佳. 新疆碳排放估算及其特征分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 188-191. [Song Mei, Shi Jia. Estimation of carbon dioxide emission in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 188-191.]

[11] 唐洪松, 马惠兰, 苏洋, 等. 新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 486-492. [Tang Hongsong, Ma Huilan, Su Yang, et al. Carbon emissions and carbon absorptions of different land use types in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3): 486-492.]

[12] 苏洋, 马惠兰, 颜璐. 新疆农地利用碳排放时空差异及驱动机理研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(6): 1162-1169. [Su Yang, Ma Huilan, Yan Lu. Spatial-temporal differences and driving mechanism of agricultural land use carbon emission in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(6): 1162-1169.]

[13] 苏洋, 马惠兰, 李凤. 新疆农牧业碳排放及其与农业经济增长的脱钩关系研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1047-1054. [Su Yang, Ma Huilan, Li Feng. Xinjiang agriculture and animal husbandry carbon emissions and its decoupling relationship with agricultural economic growth[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 1047-1054.]

[14] 冉锦成, 苏洋, 胡金凤, 等. 新疆农业碳排放时空特征、峰值预测及影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(8): 16-24. [Ran Jincheng, Su Yang, Hu Jinfeng, et al. Temporal and spatial characteristics, peak value forecast and influencing factors of agricultural carbon emissions in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(8): 16-24.]

[15] 田云, 张俊飚, 尹朝静, 等. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进——基于31个省(市、区)2002—2011年的面板数据分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 91-98. [Tian Yun, Zhang Junbiao, Yin Chaojing, et al. Distributional dynamics and trend evolution of China's agricultural carbon emissions——An analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011[J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(7): 91-98.]

[16] 冉锦成, 马惠兰, 苏洋. 西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3): 623-632. [Ran Jincheng, Ma Huilan, Su Yang. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in Northwest China[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3): 623-632.]

[17] Chen L, Zhou G X, Feng B, et al. Saline-alkali land reclamation boosts topsoil carbon storage by preferentially accumulating plant-derived carbon[J]. Science Bulletin, 2024, 69(10): 2948-2958.

[18] Qin J X, Duan W L, Zou S, et al. Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture[J]. Nature Communications, 2024, 15: 3084.

[19] Zhang J Q, Yong H, Lv N. Balancing productivity and sustainability: insights into cultivated land use efficiency in arid region of Northwest China[J]. Journal of the Knowledge Economy, 2024, 15: 13828-13856.

[20] 张晓华, 张元敏, 焦马倩, 等. 耕地净碳汇时空差异分析[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(22): 99-104. [Zhang Xiaohua, Zhang Yuanmin, Jiao Maqian, et al. Analysis of spatial and temporal differenc-

es of net carbon sink of cultivated land[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(22): 99-104.]

[21] 李波, 张俊飚. 我国农作物碳汇的阶段特征与空间差异研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(5): 1229-1233. [Li Bo, Zhang Junbiao. Study on characteristics and spatial differences of Chinese agricultural carbon sinks[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(5): 1229-1233.]

[22] 马嘉艺. 耕地利用碳效应的时空动态、驱动因素及减排潜力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023. [Ma Jiayi. The Spatiotemporal Dynamics, Drivers and Emission Reduction Potential of The Carbon Effect of Cultivated Land Use[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.]

[23] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 等. 中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 360-376. [Wu Haoyue, Meng Yue, Huang Hanjiao, et al. Spatiotemporal coupling between the net carbon sequestration of cropland use and agricultural production in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 360-376.]

[24] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full carbon cycle analyses[J]. Environment Pollution, 2002, 116: 439-444.

[25] Post W M, Kwon K C. Soil Carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.

[26] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208. [Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 203-208.]

[27] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035-2039. [Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effect of conservation tillage on the net carbon release in farmland ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2007, 26(12): 2035-2039.]

[28] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomen[J]. Biometrika, 1950, 37(1-2): 17-23.

[29] Anselin L. Local Indicators of Spatial Association—LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.

[30] 李德仁, 余涵若, 李熙. 基于夜光遥感影像的"一带一路"沿线国家城市发展时空格局分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(6): 711-720. [Li Deren, Yu Hanruo, Li Xi. The spatial-temporal pattern analysis of city development in countries along the belt and road initiative based on nighttime light data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(6): 711-720.]

[31] 宋钰, 张全景, 翟腾腾, 等. 1980—2020年黄河流域生态用地时空格局及演变特征研究[J]. 资源开发与市场, 2024, 40(8): 1128-1139. [Song Yu, Zhang Quanjing, Zhai Tengteng, et al. Spatio-temporal pattern and evolutionary heterogeneity of ecological land in the Yellow River Basin during 1980-2020[J]. Resource Development and Market, 2024, 40(8): 1128-1139.]

[32] Yin Y L, He K, Chen Z, et al. Agricultural green development to achieve food security and carbon reduction in the context of China's dual carbon goals[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2023, 10(2): 262-267.

[33] He K, Wu S, Yang Y, et al. Dynamic changes of land use and oasis in Xinjiang in the last 40 years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41: 1333-1340.

[34] Zhang H, Li D. Concept and classification of unstable farmland in arid area of Northwest China: A case study of Changji Prefecture, Xinjiang[J]. Geographical Research, 2021, 40: 597-612.

[35] 郭霞. 农用地生态价值估价方法研究[J]. 国土资源情报, 2006(3): 20-23, 34. [Guo Xia. Study on the assessment methods of ecological value of agricultural land[J]. Land and Resources Information, 2006(3): 20-23, 34.]

[36] Mathew I, Shimelis H, Mutema M, et al. Crops for increasing soil organic carbon stock: A global meta analysis[J]. Geoderma, 2020, 367, 114230.

[37] 尹飞虎, 高志建, 谢宗铭, 等. 不同碳氮施肥组合对新疆滴灌棉田冠层CO_2浓度、光合作用和产量的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 724-728. [Yin Feihu, Gao Zhijian, Xie Zongming, et al. Effects of different carbon and nitrogen fertilizer combination treatments on canopy CO_2 concentration, photosynthesis and yield formation of cotton field under drip irrigation in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(4): 724-728.]

[38] Qiang Chai, Thomas N, Chang L, et al. Integrated farming with intercropping increases food production while reducing environmental footprint[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(38): e2106382118.

[39] 苏浩, 李佳珂, 刘坤, 等. 山东省耕地利用净碳汇变化与耕地利用效益关系研究[J]. 地理科学, 2024, 44(5): 864-873. [Su Hao, Li Jiake, Liu Kun, et al. Relationship between net carbon sequestration change and cultivated land use benefit of cultivated land use in Shandong province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(5): 864-873.]

[40] 李祥. 新疆耕地利用转型及驱动机制[D]. 石河子: 石河子大学, 2023. [Li Xiang. Transformation of Farmland Use and Driving Mechanism in Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]

[41] Zhou K, Yang J N, Yang T, et al. Spatial and temporal evolution characteristics and spillover effects of China's regional carbon emissions[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 325: 116423.

Spatiotemporal evolution characteristics and contributing factors of the carbon effect in cultivated land use in Xinjiang

LYU Ning[1], GUO Yu[2], PENG Qin[2], YIN Feihu[1], ZHANG Jiaqi[1],
LIU Xingren[3], ZENG Mei[4], XU Zihan[3]

(1. Key Laboratory of North-west Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China; 4. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Using agricultural data from Xinjiang from 1991 to 2021, this study examined the temporal variations in carbon effects induced by cultivation in the region by using the carbon absorption and emission coefficient method. The spatial correlation, distribution, and evolution patterns of these carbon effects were explored by integrating Moran's *I*, centroid migration, and the standard deviational elliptical model. The aim of this paper was to investigate the spatiotemporal dynamics of carbon effect changes in cultivated land over a long-term series in Xinjiang and to assess the region's potential for carbon sequestration. The results were as follows: (1) Carbon absorption in Xinjiang's cultivated land significantly exceeded carbon emissions, demonstrating a net carbon sink effect. Furthermore, the carbon sink capacity had consistently increased, rising from 8.3 million tons in 1991 to 34.29 million tons in 2021. (2) Regions with strong carbon sink capacity were concentrated in areas with extensive cultivated land and high production of corn, wheat, and cotton. (3) The net carbon sink of cultivated land exhibits significant spatial agglomeration patterns at the county and city scales, with the center of gravity of cropland carbon sinks generally migrating to the northeast. However, over the past 30 years, it has remained situated in the Aksu region of southern Xinjiang. (4) Cropland carbon sinks are primarily attributed to carbon absorption by cotton, wheat, and corn. Conversely, the main sources of carbon emissions include the application of chemical fertilizers, farmland tillage, irrigation, and the use of agricultural films. Notably, the contribution of chemical fertilizers and agricultural films to carbon emissions is on the rise. Based on these findings, we propose an appropriate expansion of the cultivated land area and increasing the cultivation of cotton, as well as grain and oil crops in southern Xinjiang. Additionally, we should promote the planting of corn and cotton in accordance with local conditions and boost the investment in green agricultural technologies and materials to improve the production capacity of cultivated land, ensure food security, and enhance carbon sequestration.

Keywords: cultivated land use in Xinjiang; carbon sources/sinks effect; Moran's index; standard deviation ellipse; center of gravity migration trajectory model; spatio-temporal evolution characteristic